

Diseño preliminar de una Estación Terrena basada en Software Radio para aplicaciones docentes

Ramón Martínez Rodríguez-Ororio, Sergio R. Díaz-Miguel Coca

ramon@gr.ssr.upm.es

Grupo de Radiación. Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid.
ETSI de Telecomunicación. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid. ESPAÑA.

Abstract- Most of student satellite missions are based on the design, construction and launch of a picosatellite (*cubesat*) including the design of the ground station (GS). Traditional GS are based on commercial elements and are designed to support only one mission. These stations access the mission data very inefficiently, as only contact the satellite during short visibility periods. In this paper, we present a novel GS concept based on software defined radio technology that can be integrated in a global network for satellite tracking. The station will be implemented by a group of students as a part of a space project under the supervision of a faculty coordinator. The design must fulfil the requirements of low cost, remote operation, and flexibility to operate in different frequency bands. The set-up of this mid-term educational space project to build an operational GS will hopefully motivate Telecommunication Engineering students to participate and gain real hands-on experience in an international space environment.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, hay un gran número de Universidades en todo el mundo que imparten títulos relacionados con la tecnología espacial. En la mayoría de los casos, la metodología gira en torno al diseño de una misión espacial basada en un picosatélite. De una forma común, este proyecto espacial consiste en diseñar un *cubesat* de acuerdo con las fases de diseño que se aplican en una misión real. La definición del concepto de *cubesat* y algunos ejemplos reales pueden encontrarse en [1].

La metodología docente consiste en dividir a los alumnos en grupos de acuerdo con los subsistemas de la misión: propulsión, estructura, comunicaciones, TT&C, etc.

Una parte fundamental de la misión espacial es el diseño de la estación terrena. Este subsistema tiene como misión principal la comunicación con el satélite en los tiempos de visibilidad para descargar datos de telemetría, enviar comandos y recibir datos de la carga útil.

Para una Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, el diseño de la estación terrena constituye la primera aproximación para abordar el desarrollo de una misión espacial basada en un *cubesat*. Por un lado, se dispone del equipamiento necesario (osciloscopios, analizadores de espectros, bancos de soldadura, simuladores, etc.), evitando en primera instancia los bancos de pruebas de vibración y análisis térmico del módulo espacial. Además, el perfil de los alumnos facilita su participación en el diseño de la estación.

El concepto de estación de tierra está cambiando [2]. Los diseños tradicionales carecen de flexibilidad y están limitados por la rigidez de los equipos comerciales. En

particular, los equipos suelen estar preparados para comunicar tramas a 9600/1200 bps con modulaciones FSK/AFSK a través del protocolo estándar AX25 [3].

Los satélites educativos describen órbitas de baja altura (LEO). Este hecho hace que el tiempo durante el que se tiene visibilidad con el satélite desde una estación sea muy reducido. Según los datos estimados por los responsables de GENSO, los tiempos medios de visibilidad en cada pase son de 5 minutos, y sólo se puede establecer una comunicación con el satélite durante el 3 % de la vida útil [4].

Para incrementar la cantidad de datos descargados, una posible solución sería aumentar la tasa binaria del enlace, modificando el protocolo de comunicaciones y encareciendo la carga útil al necesitar mayor capacidad de almacenamiento. Con ello, el coste del satélite se encarecería. Por otro lado, las estaciones de tierra se diseñan para comunicarse con un único satélite (normalmente, el construido por cada Universidad o Laboratorio), por lo que no pueden establecer un enlace con otros satélites similares.

La solución por la que se está apostando desde diferentes entidades como la Agencia Espacial Europea (ESA) o el Space and Systems Development Laboratory (SSDL) de la Universidad de Stanford es la creación de una red global de seguimiento de satélites educativos. El objetivo es disponer de una red desplegada a nivel global, cuyas estaciones de seguimiento estén conectadas entre sí a través de Internet y sean capaces de comunicarse con el satélite. De esta forma, se mejora el acceso a los datos, se dispone de la información casi en tiempo real, y se optimiza el uso del satélite y la estación de tierra, ya que el tiempo de contacto aumenta a medida que lo hace el número de estaciones.

En este escenario, con el apoyo de la ESA y el ISEB (International Space Education Board), nace el Proyecto GENSO (Global Educational Network for Satellite Operations) [4]. El objetivo principal es definir un estándar global basado en software que permita conectar entre sí las estaciones terrenas de seguimiento de satélites educativos y de radioaficionados (operan en las mismas bandas de frecuencia), sean capaces de comunicarse con cualquier satélite de la red y envíen los datos a todos los operadores a través de Internet. La solución adoptada se basa en compartir recursos distribuidos para ofrecer cobertura y acceso global a los datos de los satélites.

La Fig. 1 muestra esquemáticamente el concepto de una red global de seguimiento. Los requisitos de la estación terrena integrada en esta red son:

- Multimisión y multicanal

- Operación remota con acceso seguro
- Bajo coste
- Posibilidad de ser utilizada con fines docentes

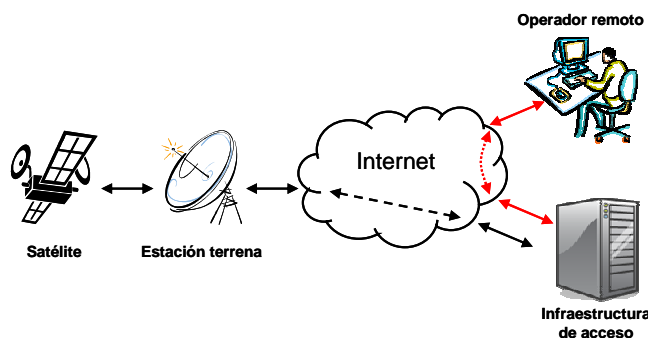


Fig. 1. Concepto de estación terrena para una red de seguimiento global.

Otra de las aproximaciones al concepto de red global de estaciones es la denominada *estación terrena virtual* creada por el SSDL [5]. Este concepto pretende integrar las ventajas aportadas por la tecnología *software defined radio* y la ejecución de rutinas sobre máquinas virtuales en lo que se conoce como Software Defined Ground Stations (SDGS) [6].

La combinación de ambas tecnologías permite diseñar una arquitectura para la estación de tierra donde las tareas de procesamiento radio son encapsuladas en máquinas virtuales que corren en diferentes procesadores (FPGAs, DSPs y, en último caso, procesadores de propósito general). Con ello, procesos como la demodulación, modulación, etapa de sincronismo, codificación de canal, etc., se encapsulan en máquinas virtuales ejecutándose en diferentes computadores interconectados a través de enlaces de banda ancha. Con esta aproximación distribuida, se incrementa la flexibilidad y mejora la fiabilidad de la estación, a cambio de realizar un procesamiento software en máquinas virtuales a menor velocidad que en hardware dedicado [7].

En este artículo, se presenta un diseño de estación de tierra basada en software radio para el seguimiento de satélites en las bandas de radioaficionados. En la sección II se comparan los diseños tradicionales con aquellos basados en *software defined radio*. La sección III presenta un diseño de estación para procesamiento de tres bandas de frecuencia (VHF, UHF y banda S) basada en muestreo paso banda, y en la sección IV se discute su aplicación docente. Finalmente, las conclusiones del estudio se recogen en la sección V.

Uno de los objetivos principales que se persigue es que la estación diseñada se integre en la red GENSO como aportación de la ETSI de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

II. ARQUITECTURA DE UNA ESTACIÓN DE TIERRA

A. Diseño tradicional "monolítico"

Los diseños tradicionales están formados por equipos comerciales conectados entre sí, lo que encarece el sistema y elimina transparencia del diseño. En general, la estación de tierra está preparada para transmitir y recibir en diferentes frecuencias, siendo posible el procesamiento simultáneo de sólo una frecuencia en cada sentido.

La estación de tierra está formada por cuatro componentes principales:

- Antena: en función de la frecuencia a emplear pueden usarse diferentes tipos de antenas. Para el caso de

satélites educativos se emplean las bandas de radioaficionados VHF y UHF (hélices, yagis), y la banda S (reflectores). Si la ganancia de la antena no es suficiente, pueden agruparse varios elementos radiantes conformando un array.

- Posicionador: la antena está conectada a un sistema rotor que apunta mecánicamente en la dirección del satélite. Las coordenadas de apuntamiento son entregadas por un software a través del puerto de control.
- Transceptor: se encarga de trasladar la información modulada a una portadora en la frecuencia del radioenlace tierra-satélite.
- Módem: equipo encargado de modular/demodular las tramas de información recibidas del satélite o transmitidas por la estación.

Como puede verse en el ejemplo de la Fig. 2, cada elemento comercial se comporta como una caja negra para el usuario que opera la estación.

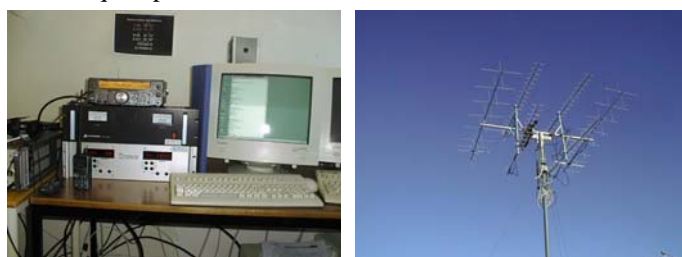


Fig. 2. Estación de tierra del Narvik University College [8].

A nivel de software, la estación requiere de un software de control de apuntamiento que oriente la antena en la dirección del satélite. Existen un gran número de alternativas, destacando aquí el software comercial NOVA y la herramienta de código abierto "Predict".

Este software de control también calcula la desviación Doppler debida al movimiento del satélite en su órbita LEO. Habitualmente, esta información se utiliza para sintonizar la frecuencia del receptor/transmisor y simplificar la etapa de recuperación de portadora en el demodulador.

B. Diseño flexible basado en software radio

La Fig. 3 muestra de forma ilustrativa la arquitectura de una estación terrena basada en *software defined radio* capaz de satisfacer los requisitos de soporte multimisión en las bandas VHF, UHF y banda S. A modo de ejemplo, decir que esta arquitectura serviría para la comunicación simultánea con un satélite transmitiendo en banda S y VHF, y recibiendo comandos en banda UHF (por ejemplo, el satélite de radioaficionados AO-51).

En primer lugar, indicar que se necesita una antena para cada banda de frecuencias para satisfacer los requisitos de balance de enlace. Asimismo, el *front-end* analógico (amplificación, filtrado y conversión de frecuencia) es independiente para cada frecuencia.

Después de la etapa de combinación/conmutación, la señal se filtra, cambia a una frecuencia intermedia y digitaliza la señal empleando una tarjeta de captura de datos (en transmisión, se realiza el proceso inverso). Una posibilidad de diseño de este bloque es el empleo de muestreo paso banda, como se comentará en la sección III.

Después del muestreo, la etapa de procesamiento digital se encarga de demodular la señal incluyendo las etapas de diezmado, sincronismo, decodificación, etc.

El subsistema de propósito general se encarga de calcular los ángulos de visión (acimut, elevación) para apuntar las antenas, controlar los posicionadores, y configurar los *switches* y sintetizadores. En el caso de las líneas de *tuning*, la estimación de desviación Doppler podría calcularse analizando en frecuencia la señal, independizando la operación de la estación del programa de control de apuntamiento [9]. Aunque no se ha incluido explícitamente en el dibujo, los subsistemas de adquisición y procesado y control se controlan desde un PC.

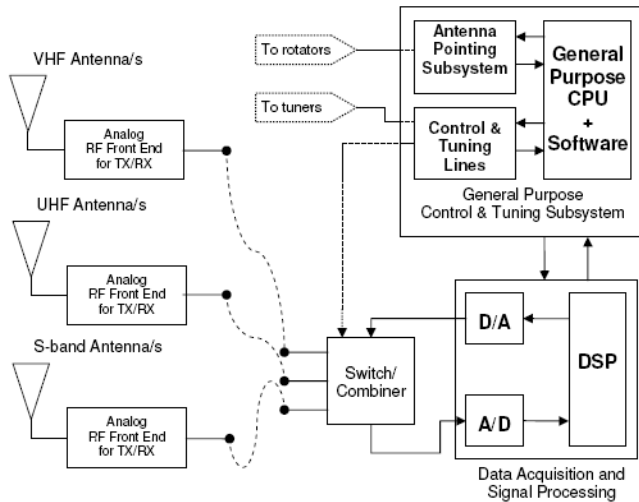


Fig. 3. Estación terrena basada en software radio.

Algunas de las innovaciones que podrían desarrollarse con una estación basada en tecnología software radio son:

- Nuevas tecnologías de *tracking*: además del control automático del apuntamiento de la antena, la plataforma software radio podría emplearse para implementar técnicas basadas en monopolso;
- Procesado en array y apuntamiento electrónico: disponiendo de un array de antenas y un receptor multicanal, se podrían introducir esquemas de conformación de haz para mejorar la calidad de la señal recibida o eliminar interferencias [10]. En línea con la técnica de *tracking*, podría complementarse el control mecánico de la antena con un barrido electrónico del haz, mejorando así la precisión del sistema de apuntamiento;
- Introducción de nuevas tecnologías de comunicaciones: en concreto, el proyecto LionSat (Local Ionospheric Measurements Satellite) de la Penn University, y patrocinado por la NASA, tiene como objetivo el diseño de una estación terrena basada en software radio para evaluar el protocolo IP a través de un nanosatélite [11].

III. CASO DE DISEÑO DE UNA ESTACIÓN

En este apartado, se presenta un ejemplo de diseño de estación basada en software radio multicanal y operativa en tres bandas de frecuencia: VHF, UHF y banda S (Tabla I). Uno de los retos de diseño es la selección de la frecuencia de muestreo. La descripción del diseño se centra en la etapa de recepción.

En un receptor software radio ideal, la señal se muestrea directamente en RF, reduciendo el número de componentes analógicos. Con una etapa de muestreo convencional basado en el criterio de Nyquist, la señal debería digitalizarse al

menos a dos veces la máxima componente de la señal para evitar *aliasing*: en este caso, $2 \times 2.45 \text{ GHz} = 4.9 \text{ GHz}$. Los inconvenientes de esta aproximación son principalmente dos: en primer lugar, no existen tarjetas en tecnología software radio con convertidores a esta velocidad puesto que se incrementaría el coste excesivamente, y por otro, procesar muestras de señal a esa velocidad no es razonable por cuestiones de coste y complejidad.

Tabla I. Bandas de frecuencia procesadas por la estación terrena basada en software radio

Banda	Límites de frecuencia
VHF	145.8-146 MHz
UHF	435-438 MHz
Banda S	2400-2450 MHz

Por ello, parece conveniente incluir una etapa de conversión de frecuencia en cada receptor para llevar la señal combinada sobre una frecuencia intermedia inferior, compatible con las velocidades de muestreo disponibles.

El siguiente paso en el diseño es doble:

- 1) Selección de la frecuencia intermedia (FI): las tres señales de RF deben combinarse en una FI evitando el solape de las tres bandas; además, la banda de guarda entre canales debe ser suficiente para no complicar excesivamente el diseño de los filtros digitales (a menor separación, mayor selectividad, número de etapas y consumo de recursos hardware);
- 2) Selección de la frecuencia de muestreo: viene determinada por la FI y los convertidores utilizados. En una tarjeta estándar como la XtremeDSP¹, la frecuencia de muestreo máxima es de 105 MHz, lo que supondría una FI máxima en el orden de los 50 MHz según el teorema de Nyquist.

Para evitar el procesamiento de muestras a esa alta velocidad, se ha optado por diseñar el transceptor basado en una etapa de muestreo paso banda: esta técnica se basa en aprovechar las diferentes réplicas de la señal muestreada para hacer la conversión de frecuencia [12][13]. En un muestreo paso banda, el parámetro de diseño no es la máxima componente de frecuencia ocupada por la señal, sino el ancho de banda de información de la señal.

De acuerdo con la Tabla I, el receptor debe ser capaz de procesar una banda de 50 MHz en banda S, mientras que en VHF y UHF los anchos de banda son de 200 KHz y 3 MHz, respectivamente.

Para la selección de la frecuencia de muestreo, se ha implementado una aplicación software que permite analizar las frecuencias de muestreo válidas para procesar tres señales en RF, evaluar los requisitos de los convertidores (resolución, SNR) y las tasas de diezmado posibles [14]. Además, incluye animaciones para evaluar el efecto de diferentes frecuencias de muestreo en el solape de las señales. La herramienta, basada en Matlab®, se denomina *Software Defined Radio Design Tool* (SDR Tool) y se instala como un fichero ejecutable que funciona bajo sistemas Windows, Unix y MacOS sin necesidad de tener Matlab® instalado. El interfaz gráfico de usuario se muestra en la Fig. 4: como entradas, el usuario introduce los límites de las tres bandas de frecuencia y el intervalo de frecuencias de muestreo disponible. El programa devuelve el conjunto de frecuencias de muestreo

¹ Virtex-IV XtremeDSP Development Kit, <http://www.xilinx.com>.

posibles y la posición de las tres réplicas de señal después del muestreo paso banda.

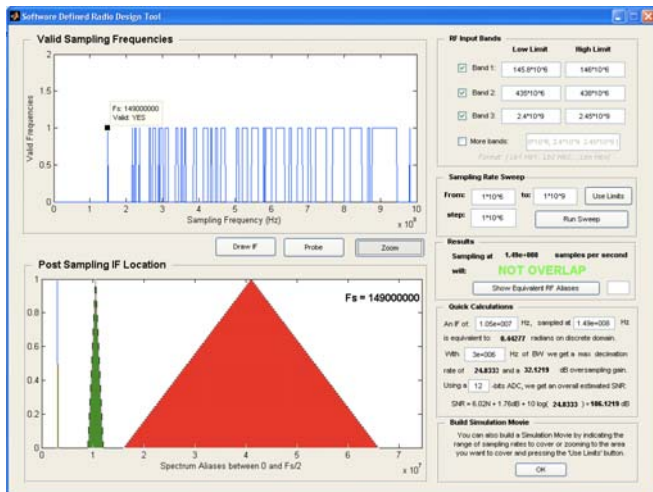


Fig. 4. Software Defined Radio Tool. Interfaz gráfico de usuario.

El diseño de bloques final se muestra en Fig. 5. Para simplificar el diseño, se procesan 20 MHz en la banda S, ancho de banda suficiente para la mayoría de aplicaciones. La frecuencia de muestreo seleccionada es de 68.04 MHz, valor factible de bajo coste con la tecnología actual.

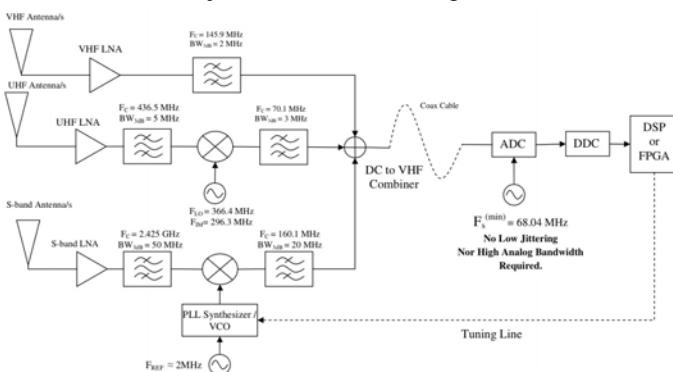


Fig. 5. Diseño final del receptor usando muestreo paso banda.

IV. APLICACIÓN DOCENTE DE LA ESTACIÓN

El diseño de la estación se plantea como un trabajo en grupo desarrollado por los alumnos bajo la supervisión de un profesor coordinador. El planteamiento se basa en que los estudiantes deben seleccionar las mejores tecnologías para la implementación y emplear diseños propios siempre que sea viable.

El desarrollo tiene un enfoque multidisciplinar que comprende las áreas de comunicaciones y procesamiento de señal (antenas, *front-end*, transceptor, diseño del enlace), electrónica (plataforma de software radio, etapas de control) y telemática (bases de datos, acceso web, seguridad).

Así, el trabajo en la estación podría basarse en una metodología basada en proyectos (*Project-based learning*), donde los alumnos participan desde diferentes asignaturas de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación. Para ello, es necesaria una coordinación estricta entre asignaturas y profesores.

Las ventajas de esta metodología práctica son: trabajo en grupo, presentación y discusión de ideas en público, y desarrollo de documentación según estándares profesionales (por ejemplo, la normativa ECSS de la ESA) para optimizar

el proceso de transferencia de conocimiento entre los grupos de trabajo.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una estación terrena basada en software radio diseñada como un vehículo para introducir aspectos prácticos en la docencia de la titulación de Ingeniero de Telecomunicación. Los principios de diseño de la estación son la flexibilidad, acceso remoto, bajo coste y capacidad para procesar varias bandas de frecuencia. Para ello, se ha seleccionado una implementación basada en software radio.

Bajo estas premisas, se mejora el acceso a los datos de la misión y se contribuye a acercar la tecnología espacial a centros que no dispongan de una estación propia.

Asimismo, una vez diseñada la estación su utilización en la docencia puede implementarse a través de actualizaciones y mejoras, así como ejemplo de funcionamiento de una estación de seguimiento de satélites.

Por último, decir que se pretende integrar la estación dentro de la red GENSO, motivando a los estudiantes a desarrollar un trabajo práctico en un entorno internacional participando en un proyecto espacial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al profesor Frank R. Vedal del Narvik University College sus valiosos comentarios y asesoramiento.

REFERENCIAS

- [1] The CubeSat Project [online]. Available: <http://www.cubesat.org>.
- [2] James Cutler, "Software Defined Ground Stations", 5th CubeSat Developers' Workshop, Cal Poly, April 9th-11th, 2008.
- [3] AX.25 Amateur Packet-Radio Link-Layer Protocol, ver. 2, Rev. 1998 [online]. Available: http://www.tapr.org/pub_ax25.html.
- [4] GENSO Project Information, <http://www.genso.org>.
- [5] James Cutler, "Lessons Learned from Remote Ground Station Operations", 4th CubeSat Developers' Workshop, Huntington Beach, CA, 19th-21st April, 2007.
- [6] Software Defined Ground Stations (SDGS), Space and Systems Development Laboratory, Stanford University [online]. Available: <http://ssdl.stanford.edu/ssdl/index.php>.
- [7] James Cutler, Armando Fox, "A Framework for Robust and Flexible Ground Station Networks", Journal of Aerospace Computing, Information and Communication, vol. 3, pp. 73-92, March 2006.
- [8] The HinCube Project, Narvik University College [online]. Available: <http://hincube.hin.no/>.
- [9] Jyh-Ching Tsai, Chiu-Teng Tsai, "Software Defined Radio Approach for the Implementation of Ground Station Receivers", 5th CubeSat Developers' Workshop, Cal Poly, April 9th-11th, 2008.
- [10] R. Martínez Rodríguez-Osorio, Alberto Bravo Sánchez, Miguel A. Salas Natera, "Design of a Software Radio Prototype for the Analysis of Beamformers in Satellite Communications", Proc. 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference (VTC-2007 Fall), pp. 2060-2064, Baltimore, MD, Sept. 30th - Oct. 3rd, 2007.
- [11] Nathan F. O'Connor, Brendan S. Surrusco, Sven G. Bilén, and Charles L. Croskey, "Software-Defined Radio Ground Station for Internet-Protocol Communications to a Low Earth Orbit Nanosatellite", Fourth Space Internet Workshop (SIW-4), Hanover, MD, 8th-10th June, 2004.
- [12] Rodney Vaughn, N. L. Scott, D. R. White, "The Theory of Bandpass Sampling", IEEE Trans. Signal Processing, vol. 39, no. 9, pp. 1973-1984, Sept. 1991.
- [13] Dennis M. Akos, Michael Stockmaster, James B. Y. Tsui, Joe Caschera, "Direct Bandpass Sampling of Multiple Distinct RF Signals", IEEE Trans. On Communications, vol. 47, no. 7, pp. 983-988, July 1999.
- [14] Sergio R. Díaz-Miguel Coca, *Proposal of a European Station Network and its Application in Teaching Satellite Communication*, Proyecto Fin de Carrera, ETSI de Telecomunicación, UPM, Diciembre 2008.